

원격탐사와 인공지능 모델링을 활용한 제주도 지역의 준맹그로브
탄소 축적량 예측Prediction of Carbon Accumulation within Semi-Mangrove
Ecosystems Using Remote Sensing and Artificial Intelligence
Modeling in Jeju Island, South Korea이철호¹ · 이종성^{1,2} · 김채빈³ · 추연수^{1,4} · 이보리^{5*}¹인하대학교 바이오시스템융합학부 박사과정, ²국립생물자원관 전문연구원, ³인하대학교 생명과학과 학부생,
⁴국립생태원 습지센터 연구원, ⁵국립산림과학원 난대·아열대산림연구소 임업연구사Cheolho Lee¹, Jongsung Lee^{1,2}, Chaebin Kim³, Yeonsu Chu^{1,4} and Bora Lee^{5*}¹Doctor Course, Department Biological Sciences and Bioengineering, Inha University, Incheon 22212, Korea²Senior Researcher, Climate Change and Environmental Biology Research Division, National Institute of Biological Resources, Incheon 22689, Korea³Undergraduate Course, Department Biological Sciences, Inha University, Incheon 22212, Korea⁴Junior Researcher, Wetland Center, National Institute of Ecology, Seochon 33657, Korea⁵Research Official, Warm-Temperate and Subtropical Forest Research Center, National Institute of Forest Science, Seogwipo 63582, Korea

Received 30 October 2023, revised 9 November 2023, accepted 9 November 2023, published online 31 December 2023

ABSTRACT: We attempted to estimate the carbon accumulation of *Hibiscus hamabo* and *Paliurus ramosissimus*, semi-mangroves native to Jeju Island, by remote sensing and to build an artificial intelligence model that predicts its spatial variation with climatic factors. The aboveground carbon accumulation of semi-mangroves was estimated from the aboveground biomass density (AGBD) provided by the Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) lidar upscaled using the normalized difference vegetation index (NDVI) extracted from Sentinel-2 images. In Jeju Island, carbon accumulation per unit area was 16.6 t C/ha for *H. hamabo* and 21.1 t C/ha for *P. ramosissimus*. Total carbon accumulation of semi-mangroves was estimated at 11.5 t C on the entire coast of Jeju Island. Random forest analysis was applied to predict carbon accumulation in semi-mangroves according to environmental factors. The deviation of aboveground biomass compared to the distribution area of semi-mangrove forests in Jeju Island was calculated to analyze spatial variation of biomass. The main environmental factors affecting this deviation were the precipitation of the wettest month, the maximum temperature of the warmest month, isothermality, and the mean temperature of the wettest quarter. The carbon accumulation of semi-mangroves predicted by random forest analysis in Jeju Island showed spatial variation in the range of 12.0 t C/ha – 27.6 t C/ha. The remote sensing estimation method and the artificial intelligence prediction method of carbon accumulation in this study can be used as basic data and techniques needed for the conservation and creation of mangroves as carbon sink on the Korean Peninsula.

KEYWORDS: Aboveground biomass, Blue carbon, Global ecosystem dynamics investigation, Random forest

요 약: 본 연구에서는 제주도에에서 자생하는 준맹그로브인 황근 (*Hibiscus hamabo*)과 갯대추나무 (*Paliurus ramosissimus*)의 탄소 저장량을 원격탐사로 추정하고 기후요인에 의하여 공간변이를 예측하는 인공지능 모델을 구축하고자 하였다. 준맹그로브의 지상부 탄소 축적량은 Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) 라이다에 의하여 제공되는 지상부 생물량 밀도

*Corresponding author: boralee7208@korea.kr, ORCID 0000-0002-6554-2252

© Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

(aboveground biomass density, AGBD)를 Sentinel-2 영상으로부터 추출한 normalized difference vegetation index (NDVI)으로 해상도를 상향하여 추정하였다. 제주도에서 단위면적당 탄소 축적량은 황근이 16.6 t C/ha, 갯대추나무가 21.1 t C/ha이었다. 제주도 전 해안에서 준맹그로브의 탄소 축적량은 11.5 t C로 추정되었다. 환경요인에 따른 준맹그로브의 탄소 축적량을 예측하기 위하여 랜덤 포레스트 기술을 적용하였다. 제주도 준맹그로브림의 분포면적 대비 지상부 생물량의 잔차를 계산하였다. 이 잔차에 영향을 미치는 주요 환경요인으로는 가장 습한 달의 강수량, 가장 더운 달의 최고온도, 등온성 및 가장 습한 달의 평균 온도가 선정되었다. 제주도에서 랜덤 포레스트 분석으로 예측된 준맹그로브의 탄소 축적량은 12.0 t C/ha - 27.6 t C/ha 범위의 공간적 변이를 나타내었다. 본 연구에서 개발된 탄소 축적량의 원격탐사 추정법과 환경요인에 따른 인공지능 예측법은 한반도에서 탄소흡수원으로서 맹그로브의 보전과 조성에 필요한 기초자료로 활용할 수 있을 것이다.

핵심어: 지상부 생물량, 탄소흡수원, 글로벌 생태계 역할 조사, 랜덤 포레스트

1. 서론

IPCC 기후변화 평가보고서에 따르면 기후변화 속도가 점차 증가하는 추세이고 현재 추세로 탄소를 배출할 경우에 세기말 전지구 평균 기온이 3.3°C - 5.7°C 상승할 것으로 예측되었다 (IPCC 2022). 기후 변화는 단순하게 기온 상승을 의미하는 것이 아니고 집중 호우, 가뭄, 이상기온 등과 같은 이상 기후를 동반할 뿐만 아니라 해수위 상승 및 식량 생산 감소 등 인간의 건강과 안전 문제와 직결되어 있다 (OECD 2011, IPCC 2018). 이러한 기후 변화에 대응하기 위해서는 온실가스 배출량을 감소하기 위하여 노력에 머무를 것이 아니라 적극적으로 대기 온실가스 감축을 위한 탄소흡수원 개발이 필요한 실정이다.

최근 온실가스 감축 수단으로 맹그로브림이 공식적으로 인정되면서 (IPCC 2019), 맹그로브림도 하나의 탄소 흡수원으로서 다양한 연구가 수행되고 있다 (Taillardat et al. 2018, Alongi 2020). 맹그로브림은 해안 습지에 분포하며 동일 면적의 열대 우림보다 최대 5배의 탄소를 저장하고 있는 것으로 밝혀졌다 (Mcleod et al. 2011). 맹그로브림은 전지구적으로 147,000 km²가 분포하며 여기에 21,896 Mt의 탄소가 저장되어 있는 것으로 추정된다 (GMA 2022). 따라서 맹그로브림은 대기 탄소흡수원으로서의 중요성이 전세계적으로 강조되고 있다 (Lovelock et al. 2018, Sanderman et al. 2018).

우리나라에서는 기온과 해수온이 낮고 특히 겨울철 기온이 영하로 내려가기 때문에 진정맹그로브 (true mangrove)는 분포하지 않는다. 하지만 제주도와 남해안에는 준맹그로브 (semi-mangrove)인 황근 (*Hibiscus hamabo*)과 갯대추나무 (*Paliurus ramosissimus*)가 자

생하고 있다 (NIBR 2023). 해안 염습지에서만 서식처하는 맹그로브와 달리 준맹그로브는 해안 염습지와 주변 육상역에서도 생육하는 특성을 지니는 종으로, 맹그로브와 함께 탄소 흡수원으로 고려된다 (Hickey et al. 2018, Nóbrega et al. 2019). 기후변화 시나리오를 적용한 중분포 모델에 따르면 2100년까지 기후변화에 따라서 준맹그로브가 한반도 전역에 확산할 수 있는 것으로 예측되었다 (NIFS 2022). 따라서 준맹그로브인 황근과 갯대추나무, 두 종은 효과적인 대기 탄소흡수원으로 기능할 것으로 기대된다.

본 연구에서는 제주도와 한반도에서 준맹그로브림을 보전하고 적극적으로 맹그로브림을 조성하기 위한 기초자료를 구축하기 위하여 황근과 갯대추나무의 탄소저장량을 평가하고자 하였다. 따라서 본 연구의 목적은 제주도에 자생하는 준맹그로브림에서 GEDI 라이더 자료를 이용하여 원격탐사로 황근과 갯대추나무의 지상부 생물량 및 탄소축적량을 추정하고, 인공지능을 적용하여 기후 환경변수에 따른 이들 종의 탄소축적량을 예측할 수 있는 모델을 개발하고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1 연구 대상 식물종 및 지소

제주도에서 준맹그로브림의 탄소 축적량을 추정하고 기후요인에 따른 공간변이를 모델링하기 위하여 이곳에서 자생하는 황근 (*Hibiscus hamabo*)과 갯대추나무 (*Paliurus ramosissimus*)를 조사대상 종으로 선정하였다. 황근은 관목으로서 갯벌이나 암반지에서 주로 생육하며 한국, 중국, 일본 등 동아시아 전반에서 서식한다. 갯대추나무는 또한 관목으로서 주로 해안에서 토심이 얇은 암반 위에서 생육하며 황근과 마찬가지로 한

국, 중국, 일본 등 동아시아 전반에 서식한다. 황근과 갯대추나무는 모두 준맹그로브로서 조간대에서만 생육이 가능한 진정 맹그로브와는 달리 해안 육상까지 분포할 수 있다 (Ahn et al. 2003, Li et al. 2009).

본 연구의 연구대상지는 해안 조간대와 유역에 분포하는 준맹그로브 생육 특성에 맞추어 제주도 해안선으로 설정했다. 제주도 해안선은 QGIS ver. 3.22 (QGIS Association 2022)를 이용하여 4 km × 4 km의 공간 해상도를 가지는 래스터 (raster) 로 생성한 후에 Natural Earth (Natural Earth 2022)에서 제공하는 1:10,000,000 축척의 전 지구 벡터 (vector) 자료로부터 추출하였다. 이때 면적이 4 km × 4 km 보다 좁은 육상 면적은 조사지에서 제외하였다. 황근과 갯대추나무의 실제 분포지는 드론으로 촬영하여 제작된 식생 폴리곤을 이용하였다 (NIFS 2023).

2.2 생물량 원격탐사

제주도에 자생하는 황근과 갯대추나무의 탄소 축적량을 추정하기 위하여 원격탐사 자료로부터 생물량을 추정하였다. 먼저, 이들 식물의 지상부 생물량 밀도 (AGBD, aboveground biomass density)를 추정하기 위하여 NASA ORNL DAAC에서 제공하는 라이다 측정 AGBD를 수집하였다 (Duncanson et al. 2022, Musthafa and Singh 2022). 이 AGBD는 2019년 4월부터 2021년 8월 사이의 GEDI (Global Ecosystem Dynamics Investigation)에서 라이다로 관측된 높이와 면적으로부터 추정된 값으로, 단위면적 당 삼림의 지상부 건조 생물량이다 (in tonnes of dry matter per hectare, t DM/ha). 그러나 GEDI 기반 AGBD 자료의 공간해상도가 1 km × 1 km이기 때문에 제주도에 분포지 면적이 좁고 파편화된 황근과 갯대추나무의 생물량 추정에 직접 이용하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 고해상도의 다분광 위성 영상을 이용하여 AGBD 자료의 해상도를 상향 (upscaling) 하였다. 이를 위하여 Sentinel-2 위성 영상으로부터 NDVI (normalized difference vegetation index)를 산출하였다. 10 m × 10 m 해상도로 구축된 자료로부터 AGBD-NDVI 회귀식을 도출하였다 (Lu et al. 2017). 이 회귀식을 이용하여 10 m × 10 m 해상도로 상향된 AGBD 자료를 구축하였다. 최종적으로 해상도 상향 AGBD 자료를 황근과 갯대추나무 분포도와 중첩하여 준맹그로브 지상부 생물량을 추정하였다.

2.3 생물량 모델링

황근과 갯대추나무의 탄소 축적량을 환경요인으로 서 예측할 수 있는 모델을 구축하기 위하여 인공지능 모델링 방법을 적용하였다. 우선, 원격탐사 자료를 이용하여 추정된 군집의 면적과 지상부 생물량 사이의 회귀 분석을 실시하였다. 회귀분석에서는 원자료를 log 변환하고 단순선형 회귀를 적용하였다. 회귀분석 결과에서 산출된 잔차 (deviation)를 생물량의 공간변이 분석에 활용했다. 잔차가 양수인 경우는 회귀식 기반 예측 생물량에 비해 실제 생물량이 높은 경우이기 때문에 상대적으로 면적 대비 생물량이 많은 지역이며, 잔차가 음수인 경우는 면적 대비 생물량이 적은 지역이기 때문에 잔차를 준맹그로브림의 상대활력도라고 가정하였다. 추후 분석을 위하여 잔차가 정규성을 가지고 있는지를 Kolmogorov-Smirnov 검정으로 확인하였다 (Kolmogorov 1933).

제주도에서 준맹그로브 지상부 생물량의 공간 변이에 영향을 미치는 환경요인을 파악하기 위하여 식물 생장된 관련된 환경요인 자료를 구축하였다. 모델링에 이용한 환경요인은 고도와 기후 관련 19개 요인으로 총 20개 환경요인이다 (Table 2). 기후 관련 환경 요인은 생물기후 인자 (bioclimatic variables)로서 생물 생육에 영향을 미치는 기온과 강수량과 관련된 변수로서 Worldclim에서 자료를 확보하였다 (WorldClim 2017).

준맹그로브 군집에서 생물량의 공간변이인 잔차와 환경요인 사이 관계를 파악하기 위하여 랜덤 포레스트 (random forest) 회귀 분석을 수행하였다. 랜덤 포레스트는 의사결정나무를 다수 생성하여 결과값을 앙상블하는 방법이다 (Breiman 2001). 인공지능을 활용하는 이 기법은 배깅 (bagging) 방법을 활용하여 기존 의사결정나무의 한계점이었던 과적합 문제를 해결한다. 또한 의사결정나무를 생성할 때 임의의 변수를 적용하는 방법을 사용하므로 편향하지 않은 분석 결과가 산출되며 적합도가 높다 (Larivière and Van den Poel 2005, Oliveira et al. 2012). 본 연구에서는 10,000개의 의사결정나무를 생성하였다. 1개의 의사결정나무를 생성할 때 고려한 변수의 수는 전체 변수의 제공급 수를 사용하는 것이 가장 적합도가 높은 것으로 알려져 있기 때문에 4개로 하였다 (Breiman 2001). 생성된 랜덤 포레스트 모델에서 각각의 환경요인이 준맹그로브림 활력도 (회귀식 잔차)에 미친 영향을 부분-의존도 그림

(partial-dependence plot, PDP)으로 제시하였다. PDP는 각 환경요인이 지상부 생물량 잔차에 미치는 독립적인 영향을 함수 관계로 보여준다. 랜덤 포레스트와 PDP는 R 환경 (R Development Core Team 2023)에서 ‘randomForest’ 패키지 (Liaw and Wiener 2002)를 사용하였다. 최종적으로 식물의 탄소 축적량은 생물량의 50%로 간주하였다 (IPCC 2021).

3. 결과 및 고찰

3.1 탄소 축적량

제주도 지역에서 준맹그로브의 지상부 생물량을 추정하기 위하여 1 km × 1 km 공간 해상도의 GEDI 라이다 자료를 이용한 지상부 생물량 밀도 (AGBD)를 추출하였다 (Fig. 1). 제주도에서 AGBD는 0 t DM/ha - 308 t DM/ha의 범위이었다. 특히 준맹그로브가 분포하는 해안에서는 0 t DM/ha - 77 t DM/ha의 범위에 속하였

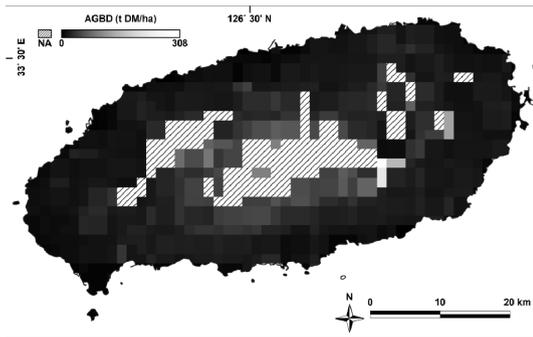


Fig. 1. Aboveground biomass density (AGBD) of 1 km × 1 km resolution based on The Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) in Jeju Island, South Korea. The hatched area has no available data.

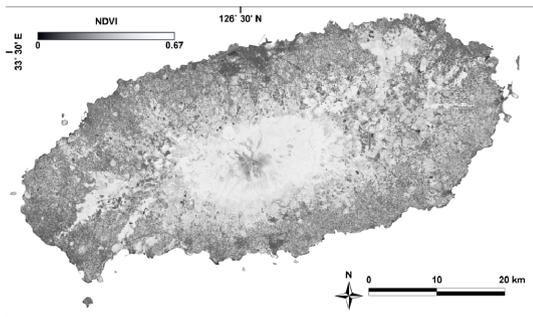


Fig. 2. Normalized difference vegetation index (NDVI) of 10 m × 10 m resolution based on Sentinel-2 image in Jeju Island, South Korea.

다. 제주도 해안에 좁게 분포하는 준맹그로브의 특성에 맞추어 생물량의 공간 해상도를 상향하기 위하여 Sentinel-2 위성 영상으로부터 10 m × 10 m 공간 해상도의 NDVI는 높은 공간 변이를 보였다 (Fig. 2). 제주도 전역과 해안에서 NDVI는 0 - 0.67의 범위이었다. 최종적으로 제주도에서 공간 해상도가 높은 준맹그로브 림의 지상부 생물량을 정량하기 위하여, 라이다 기반 AGBD 자료와 위성영상 기반 NDVI 자료의 관계를 분석하였다. 회귀분석에 의하여 $AGBD (t DM/ha) = 2.134 + 87.978 NDVI (R^2 = 0.5903, p < 0.001)$ 의 유의한 회귀식이 도출되었다 (Fig. 3).

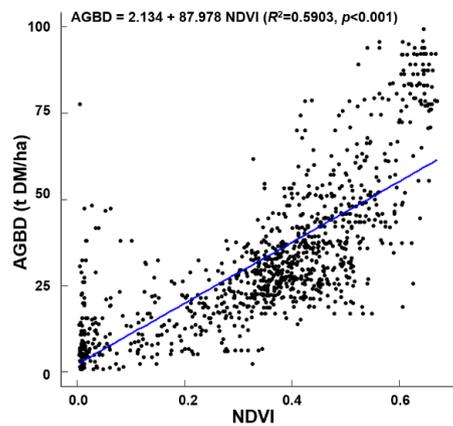


Fig. 3. Relationship between normalized difference vegetation index (NDVI) and aboveground biomass density (AGBD) of the semi-mangrove forests in Jeju Island, South Korea.

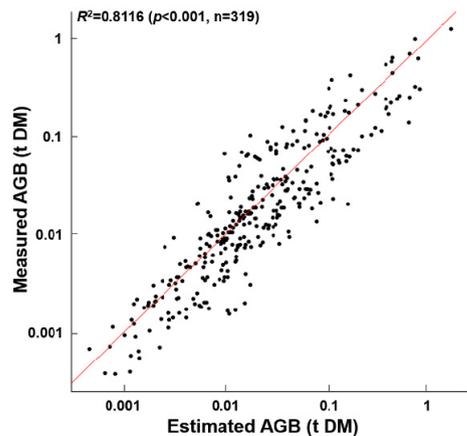


Fig. 4. Relationship between aboveground biomass density (AGBD) estimated by remote sensing with upscaled Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) and measured with the allometric methods in the semi-mangrove forest of Jeju Island, South Korea.

원격탐사 기반 지상부 생물량 추정 of 신뢰성을 확인하기 위하여 생물량 현장 측정 자료 (NIFS 2023)를 이용하여 검증하였다. 원격탐사 기반 추정 생물량과 측정 생물량 사이에는 고도로 유의한 상관관계 ($R^2 = 0.8116$, $p < 0.001$)가 나타났다 (Fig. 4). 따라서 원격탐사에 의한 지상부 생물량 추정에 대한 신뢰성이 확보되었다고 판단하여 이를 분석에 활용하였다.

원격탐사에 의하여 추정된 래스터에서의 AGBD는 황근이 33.1 t DM/ha (16.6 t C/ha) 이고 갯대추나무는 황근보다 1.3배 높은 42.1 t DM/ha (21.1 t C/ha) 이다. 이는 갯대추나무가 황근보다 목재의 밀도가 높기 때문이다 (NIFS 2023). 한편, 이를 황근과 갯대추나무가 분포하는 제주도 해안에서 파악된 분포 면적을 곱하여 산출한 준맹그로브의 지상부 생물량과 탄소 축적량은 각

각 23.0 t DM, 11.5 t C로 추정 되었다 (Table 1). 이 탄소 축적량은 제주도 내 황근이 갯대추나무보다 8배 넓은 분포 면적을 가지고 있는 결과가 반영되어, 황근이 9.7 t C (84%), 갯대추나무가 1.8 t C (16%)을 차지하였다.

3.2 준맹그로브림 탄소 축적량 모델링

제주도에서 준맹그로브림의 지상부 생물량의 공간 변이를 추정하기 위하여, 준맹그로브림 총 319개 군집의 분포 면적과 NDVI를 기반으로 예측한 생물량 사이의 회귀분석을 수행하였다 (Fig. 5). 319개 준맹그로브림 군집 중 280개는 황근, 39개는 갯대추나무 군집이었다. 황근의 회귀식은 $\text{Log (AGB, kg DM)} = -0.27 + 0.84 \text{ Log (Area, m}^2\text{)}$ 이었다 (Fig. 5 (a)). 이 회귀식으로

Table 1. Aboveground biomass density, aboveground biomass, and aboveground carbon accumulation estimated by remote sensing with the upscaled Global Ecosystem Dynamics Investigation (GED1) in the semi-mangrove forests of *Hibiscus hamabo* and *Paliurus ramosissimus* in Jeju Island, South Korea

Species	Study site	Area (m ²)*	Aboveground biomass density (t DM/ha)	Aboveground biomass (t DM)	Aboveground C accumulation (t C)
<i>H. hamabo</i>	Biyang-do 1	179	25.3	0.45	0.23
	Biyang-do 2	301	19.4	0.58	0.29
	Biyang-do 3	618	19.6	1.21	0.60
	Gimnyeong-ri 2	72	39.9	0.29	0.14
	Gimnyeong-ri 3	189	41.1	0.78	0.39
	Hado-ri 1	418	33.0	1.38	0.69
	Hado-ri 2	406	38.3	1.56	0.78
	Hado-ri 3	300	34.9	1.05	0.52
	Hado-ri 4	405	41.4	1.67	0.84
	Onpyeong-ri 1	399	36.7	1.46	0.73
	Pyoseon-ri 2	78	39.2	0.31	0.15
	Siksanbong 1	910	30.4	2.76	1.38
	Siksanbong 2	1,404	42.2	5.93	2.96
	Wimi-ri 1	18	22.0	0.04	0.02
Total (or mean)	5,697	(mean) 33.1	19.47	9.73	
<i>P. ramosissimus</i>	Gimnyeong-ri 1	291	56.9	1.65	0.83
	Ilgwa-ri 1	211	34.0	0.72	0.36
	Onpyeong-ri 2	12	52.8	0.07	0.03
	Pyoseon-ri 1	145	41.2	0.60	0.30
	Sinchang-ri 1	97	39.3	0.38	0.19
	Yongsu-ri 1	47	28.2	0.13	0.07
	Total (or mean)	804	(mean) 42.1	3.55	1.78
Total (or mean)	6,501	(mean) 35.8	23.02	11.51	

*Data from NIFS (2023).

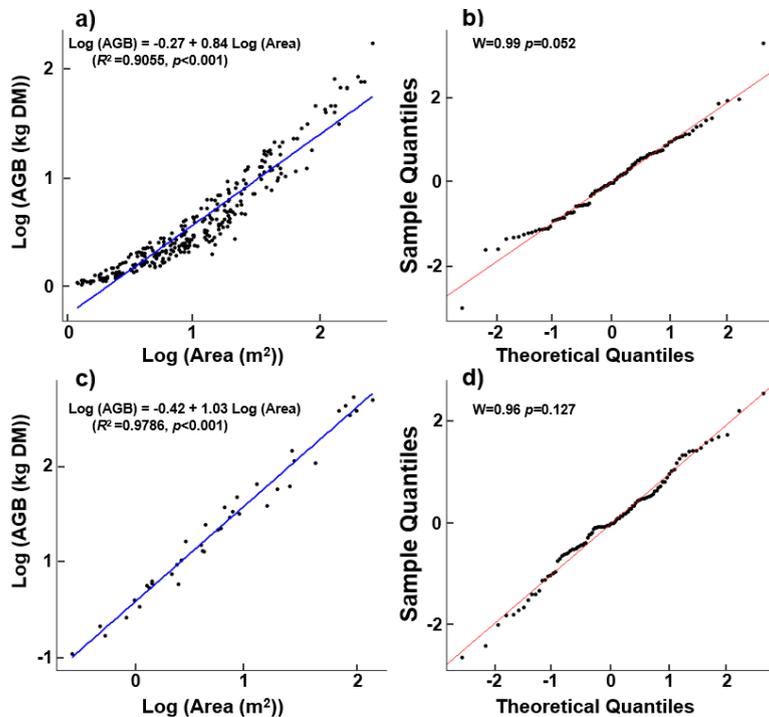


Fig. 5. Relationship between the occupied area and aboveground biomass (AGB) of *Hibiscus hamabo* forests (a) and *Paliurus ramosissimus* forests (c), and plots of Kolmogorov-Smirnov normality test of the deviations of *H. hamabo* (b) and *P. ramosissimus* (d).

Table 2. Importance values of environmental variables calculated from random forest regression for estimation of aboveground biomass density of *Hibiscus hamabo* and *Paliurus ramosissimus*

Group	Environmental variable	Unit	Importance
	Variable		
Climate	Precipitation of wettest month	mm	0.9138
	Max temperature of warmest month	°C	0.7887
	Isothermality	%	0.7879
	Mean temperature of wettest quarter	°C	0.7541
	Temperature seasonality	%	0.2795
	Temperature annual range	°C	0.2534
	Mean diurnal range	°C	0.1952
	Mean temperature of driest quarter	°C	0.1930
	Mean temperature of coldest quarter	°C	0.1897
	Annual mean temperature	°C	0.1808
	Min temperature of coldest month	°C	0.1795
	Precipitation of warmest quarter	°C	0.1395
	Precipitation of wettest quarter	mm	0.1359
	Mean temperature of warmest quarter	mm	0.0899
	Annual precipitation	mm	0.0804
	Precipitation of driest quarter	mm	0.0696
	Precipitation of coldest quarter	mm	0.0627
	Precipitation of driest month	mm	0.0422
Precipitation seasonality	mm	0.0414	
Geomorphology	Elevation	EL m	0.0279

부터 벗어난 정도인 잔차의 분포는 Kolmogorov-Smirnov 검증에서 정규성을 보였다 (Fig. 5 (b)). 또한 갯대추나무의 회귀식은 $\text{Log}(\text{AGB, kg DM}) = -0.42 + 1.03 \text{Log}(\text{Area, m}^2)$ 이었고 (Fig. 5 (c)), 잔차의 정규성은 유의하였다 (Fig. 5 (d)). 두 종 모두에서 분포 면적이 증가할수록 생물량이 증가하는 경향이었고, 특히 갯대추나무 군집에서 생물량이 더 크게 증가하였다.

랜덤 포레스트 회귀분석 결과에 의하면 준맹그로브림의 활력도인 잔차에 미치는 영향력은 입력한 20개 환경변수 중에서 ‘가장 습한 달의 강수량’이 가장 높았다 (중요도 0.9138) (Table 2). 다음으로 영향력이 큰 변수는 ‘가장 따뜻한 달의 최고 기온’, ‘등온성’, ‘가장 습한 분기의 평균 기온’으로서 이들 변수의 중요도가 0.7 이상이었다.

각 변수의 독립적인 영향을 판별하는 부분의존도 그림 (PDP)에 따르면, 주요 4개 환경변수는 그 값이 증가할수록 지상부 생물량의 잔차가 높아지는 경향을 보였다 (Fig. 6). 특히 ‘가장 습한 달의 강수량’이 275 mm 이상, ‘가장 따뜻한 달의 최고 기온’이 29.0°C 이상, ‘등온

성’이 24.1% 이상, ‘가장 습한 분기의 평균 기온’이 24.0°C 이상인 기후를 가진 해안에서 준맹그로브의 지상부 생물량이 높을 것으로 예상된다 (Fig. 6). 따라서 제주도에서 기온이 높은 시기의 강수량이 많고 기온이 높을수록 준맹그로브림의 활력도가 높았다. 맹그로브는 열대, 아열대 해안 염습지에 분포하기 때문에 분포 가능 여부는 주로 기온이 낮을 때 온도의 영향을 크게 받는데 특히 기온이 0°C 이하로 내려가는 지역에서는 생육이 제한된다 (NIFS 2022). 준맹그로브인 황근과 갯대추나무는 상대적으로 기온이 다소 낮은 곳에서도 생육이 가능하지만 다른 진정맹그로브와 같이 이들의 생장은 기온의 영향을 크게 받는다 (NIFS 2022).

준맹그로브의 지상부 생물량의 50%를 탄소로 전환한 탄소 축적량을 환경요인에 의한 랜덤 포레스트 모델로 추정된 것과 NDVI 기반으로 예측한 것과 비교하면, 두 값 사이에는 유의한 상관관계를 보이나 설명력은 다소 떨어졌다 ($R^2 = 0.64, p < 0.001$) (Fig. 7). 기후환경요인 기반 랜덤 포레스트 회귀분석으로 예측한 제주도의 준맹그로브 지상부 잠재 탄소 축적량은 11.99 t C/ha -

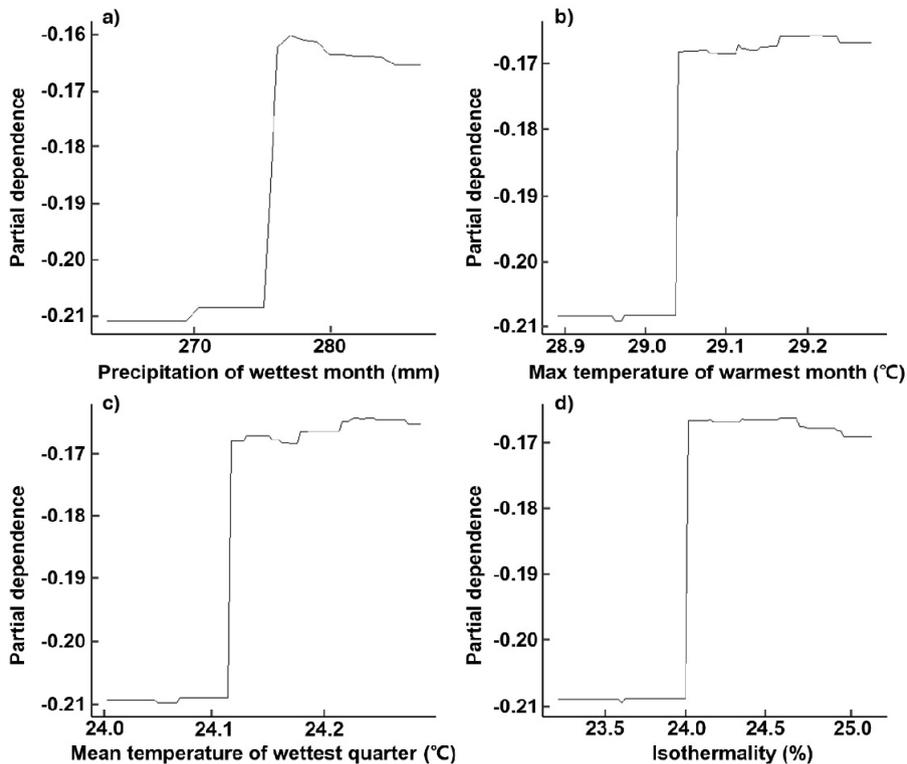


Fig. 6. Partial dependence plots, based on results from the random forest analysis, showing the major environmental variables on the aboveground biomass deviations of the semi-mangrove forests.

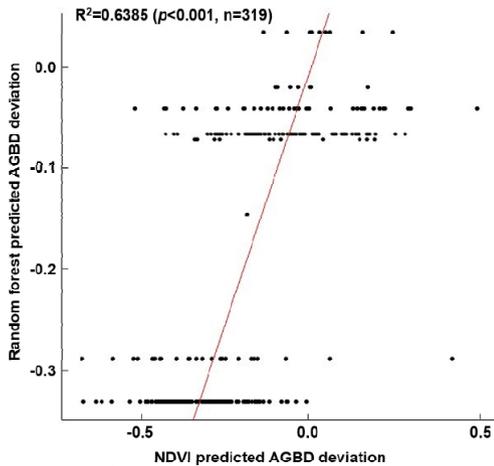


Fig. 7. Relationship between aboveground biomass density (AGBD) deviation predicted by normalized difference vegetation index (NDVI) and values predicted by random forest analysis.

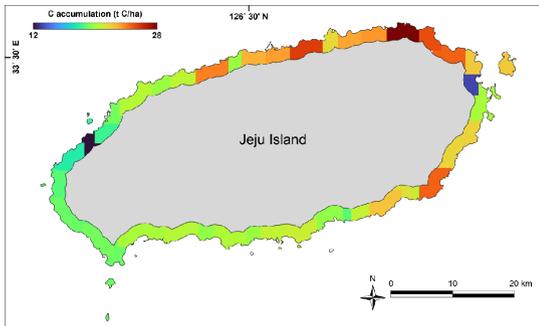


Fig. 8. Potential aboveground carbon accumulation of the semi-mangrove forests simulated by random forest modeling based on environmental variables in Jeju Island, South Korea.

27.67 t C/ha의 범위이었다 (Fig. 8). 제주도 북동 해안에서 탄소 축적량이 많았는데 특히 구좌읍 남쪽 해안에서 높았다. 이에 반하여 제주도 동쪽의 비양도 인근 해안에서 가장 낮은 축적량을 보였다 (11.99 t C/ha). 이 지역은 황근이 생육하고 있으나 면적이 좁은 소규모 황근림이 다수 분포하고 있다. 해당 지역은 준맹그로브림 생물량에 가장 큰 영향을 미치는 환경 요인들인 가장 습한 달의 강수량은 275 mm, 가장 따뜻한 달의 최고 기온 28.9°C 그리고 가장 습한 분기의 평균 기온 24.0°C로 랜덤포레스트 결과 기반 PDP에 따르면 생물량이 낮을 것으로 분석되는 기후 조건을 가졌다 (Fig. 6). 황근과 갯대추나무의 준맹그로브 지하부 생물량은 지상부 생물량의 평균 40% (NIFS 2023)로 추정되므로 준맹그로

브 식물체 전체의 탄소 축적량은 16.79 t C/ha - 38.74 t C/ha으로 예측된다. 실제 준맹그로브림의 탄소 축적량은 낙엽 및 토양의 탄소량도 포함하여야 하므로 생태계 전체의 탄소 축적량은 이보다 많을 것으로 판단된다.

본 연구에서 사용한 준맹그로브 군집의 수와 면적이 작고, 환경변수가 전세계 예측 자료를 이용하여 공간해상도가 낮았기 때문에 세밀한 분석 결과를 산출하지 못한 것으로 판단된다. 그러나 원격탐사 자료와 예측 결과 사이의 오차가 일정한 경향성을 보였기 때문에 맹그로브 군락 자료를 더 확보하고 국내 자료 기반 공간해상도가 높은 환경 변수를 사용하여 추가적인 연구가 수행된다면 더 정확한 기대 탄소 축적량 분석이 가능할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 제주도 내 자생하는 준맹그로브 황근과 갯대추나무의 탄소 축적량을 원격탐사로 추정하고, 인공지능 모델링 기법으로 이용하여 기후환경 요인으로 잠재 탄소 축적량을 예측하는 모델을 구축하였다. 수목의 생물량을 직접 측정하는 것은 상당한 시간과 노력을 요구하고 넓은 지역의 생물량을 파악하기 어려운 문제를 가진다. 본 연구에서는 미국 NASA에서 제공하는 GEDI 라이더 정보를 이용하여 원격으로 지상부 생물량을 추정할 수 있는 방안은 제주도 준맹그로브에 적용하였다. 그러나 공간적으로 좁게 분포하는 이들 종의 생물량을 원격탐사하기 위하여 Sentinel-2 영상으로부터 NDVI를 추출하여 GEDI 자료의 공간해상도를 상향시킴으로써 제주도에서 준맹그로브의 탄소 흡수원 기능을 효과적으로 정량화할 수 있었다.

탄소 흡수원인 맹그로브의 탄소 축적량에 대하여 기후변화에 따른 변화량과 맹그로브림을 조성하였을 때 탄소 흡수 효과를 예측할 수 있는 인공지능 모델을 구축할 필요가 있다. 이를 위하여 본 연구에서는 제주도 준맹그로브림의 분포면적 대비 지상부 생물량의 잔차를 추정하고 이 잔차를 기후환경요인으로 랜덤 포레스트 분석으로 예측할 수 있는 모델을 구축하였다. 개발된 인공지능 모델을 이용하여 제주도 해안에 기후요인에 따른 준맹그로브 탄소 축적량의 공간 변이를 추정할 수 있었다. 본 연구 결과는, 미래 기후변화로 인해 유입될 가능성이 있는 맹그로브림의 효율적인 조성과 현재 제

주도 내 자생하는 황근과 갯대추나무 생육지 관리를 위하여 기초 자료로서 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 특히 이들 식물을 이용하여 대기 탄소를 제거하는 적극적인 탄소 중립 정책에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국립산림과학원 난대·아열대산림연구소 ‘자생 맹그로브 국내 잠재조성 예측 고도화 및 맹그로브류 탄소지도 제작’ (과제번호 FE0100-2022-04-2023)에 의해 수행되었습니다.

References

- Ahn, Y.H., Chung, K.H. and Park, H.S. 2003. Vegetation and flora of *Hibiscus hamabo* inhabited naturally in Soan Island. *Journal of Environmental Science International* 12(11): 1181-1187. (in Korean)
- Alongi, D.M. 2020. Carbon balance in salt marsh and mangrove ecosystems: A global synthesis. *Journal of Marine Science and Engineering* 8(10): 767.
- Breiman, L. 2001. Random forests. *Machine Learning* 45: 5-32.
- Duncanson, L., Kellner, J.R., Armston, J., Dubayah, R., Minor, D.M., Hancock, S., Healey, S.P., Patterson, P.L., Saarela, S. and Marselis, S. 2022. Aboveground biomass density models for NASA's Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) lidar mission. *Remote Sensing of Environment* 270: 112845.
- GMA. 2022. The State of the World's Mangroves. Global Mangrove Alliance, Arlington, USA.
- Hickey, S.M., Callow, N.J., Phinn, S., Lovelock, C.E. and Duarte, C.M. 2018. Spatial complexities in aboveground carbon stocks of a semi-arid mangrove community: A remote sensing height-biomass-carbon approach. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 200: 194-201.
- IPCC. 2018. Special Report: Global Warming of 1.5°C. Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland.
- IPCC. 2019. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland.
- IPCC. 2021. Climate change 2021: The Physical Science Basis. Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland.
- IPCC. 2022. Climate change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland.
- Kolmogorov, A.N. 1933. Sulla determinazione empirica di una legge di distribuzione. *Giorn Dell'inst Ital Degli Att* 4: 89-91.
- Larivière, B. and Van den Poel, D. 2005. Predicting customer retention and profitability by using random forests and regression forests techniques. *Expert Systems with Applications* 29(2): 472-484.
- Li, C.H., Zhou, H.W., Wong, Y.S. and Tam, N.F.Y. 2009. Vertical distribution and anaerobic biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in mangrove sediments in Hong Kong, South China. *Science of the Total Environment* 407(21): 5772-5779.
- Liaw, A. and Wiener, M. 2002. Classification and regression by random forest. *R News* 2(3): 18-22.
- Lovelock, C.E., Friess, D.A., Kauffman, J.B. and Fourqurean, J.W. 2018. Human impacts on blue carbon ecosystems. In, Windham-Myers, L., Crooks, S. and Troxler, T.G. (eds.), *A Blue Carbon Primer*, CRC Press, Boca Raton, USA. pp. 17-24.
- Lu, X., Zheng, G., Miller, C. and Alvarado, E. 2017. Combining multi-source remotely sensed data and a process-based model for forest aboveground biomass updating. *Sensors* 17(9): 2062.
- Mcleod, E., Chmura, G.L., Bouillon, S., Salm, R., Björk, M., Duarte, C.M., Lovelock, C.E., Schlesinger, W.H. and Silliman, B.R. 2011. A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂. *Frontiers in Ecology and the Environment* 9(10): 552-560.
- Musthafa, M. and Singh, G. 2022. Forest above-ground woody biomass estimation using multi-temporal spaceborne LiDAR data in a managed forest at Haldwani, India. *Advances in Space Research* 69(9): 3245-3257.
- Natural Earth. 2022. Global 1:10 m Cultural Vectors. <https://www.naturalearthdata.com>. Accessed 24 April 2023.
- NIBR. 2023. National List of Species of Korea. National Institute of Biological Resources. <https://species.nibr.go.kr/index.do>. Accessed 3 April 2023.
- NIFS. 2022. Analysis and Prediction of Potential Distribution of Mangroves in Korea. National Institute of Forest Research, Seoul, South Korea. (in Korean)
- NIFS. 2023. Advanced Prediction of Potential Distribution and Production of Carbon Maps of Indigenous Mangroves in Korea. National Institute of Forest Research, Seoul, South Korea. (in Korean)
- Nóbrega, G.N., Ferreira, T.O., Siqueira Neto, M., Mendonça, E.D.S., Romero, R.E. and Otero, X.L. 2019. The importance of blue carbon soil stocks in tropical semiarid mangroves: a case study in Northeastern Brazil. *Environmental Earth Sciences* 78: 1-10.
- OECD. 2011. OECD Environmental Outlook to 2050. Organisation for Economic Co-operation and Development. pp. 397-413.

- Oliveira, S., Oehler, F., San-Miguel-Ayanz, J., Camia, A. and Pereira, J.M. 2012. Modeling spatial patterns of fire occurrence in Mediterranean Europe using multiple regression and random forest. *Forest Ecology and Management* 275: 117-129.
- QGIS Association. 2022. QGIS Geographic Information System. <http://www.qgis.org>. Accessed 1 October 2022.
- R Development Core Team. 2023. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria.
- Sanderman, J., Hengl, T., Fiske, G., Solvik, K., Adame, M.F., Benson, L., Bukoski, J.J., Carnell, P., Cifuentes-Jara, M., Donato, D., Duncan, C., Eid, E.M., Ermgassen, P.Z., Ewers, C., Glass, L., Gress, S., Jardine, S.L., Jones, T., Macreadie, P., Nsombo, E.N., Rahman, M.M., Sanders, C., Spalding, M. and Landis, E. 2018. A global map of mangrove forest soil carbon at 30 m spatial resolution. *Environmental Research Letters* 13(5): 055002.
- Taillardat, P., Ziegler, A.D., Friess, D. A., Widory, D., Van, V. T., David, F., Nguyễn, T.N. and Marchand, C. 2018. Carbon dynamics and inconstant porewater input in a mangrove tidal creek over contrasting seasons and tidal amplitudes. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 237: 32-48.
- Worldclim. 2017. Global climate and weather data. <https://www.worldclim.org/>. Accessed 25 May 2023.